

A dramatic scene from Star Wars showing Darth Vader on the left and Obi-Wan Kenobi on the right. They are engaged in a lightsaber duel, with their blades crossed in the center. The background is dark and smoky, with light reflecting off the blades and the characters' armor and robes. The overall tone is intense and cinematic.

パルス磁石とFabry-Pérot共振器を用いた
電磁場の非線形相互作用の探索

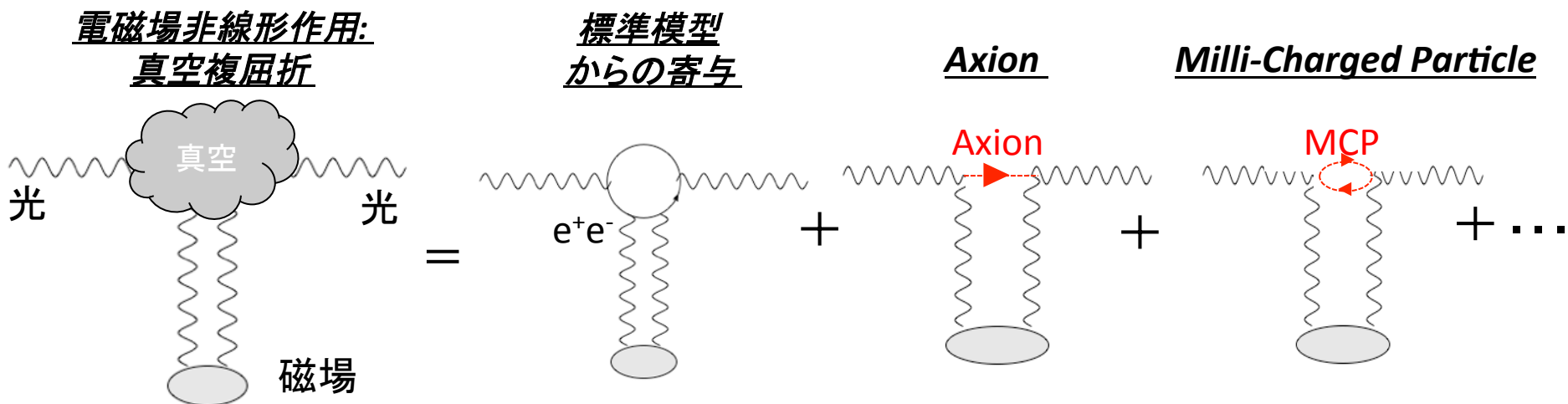
東京大学浅井研究室

樊 星

第23回ICEPPシンポジウム

電磁場の非線形相互作用の持つ物理

- 標準模型や多くのBSM理論により、電磁場の非線形相互作用が予測されている。



- 一つの結果として、**磁場中を進む直線偏光が楕円偏光になる**ことが予測されている(←真空複屈折)
- 獲得する楕円偏光度 ψ は磁場の2乗、相互作用長の1乗に比例。

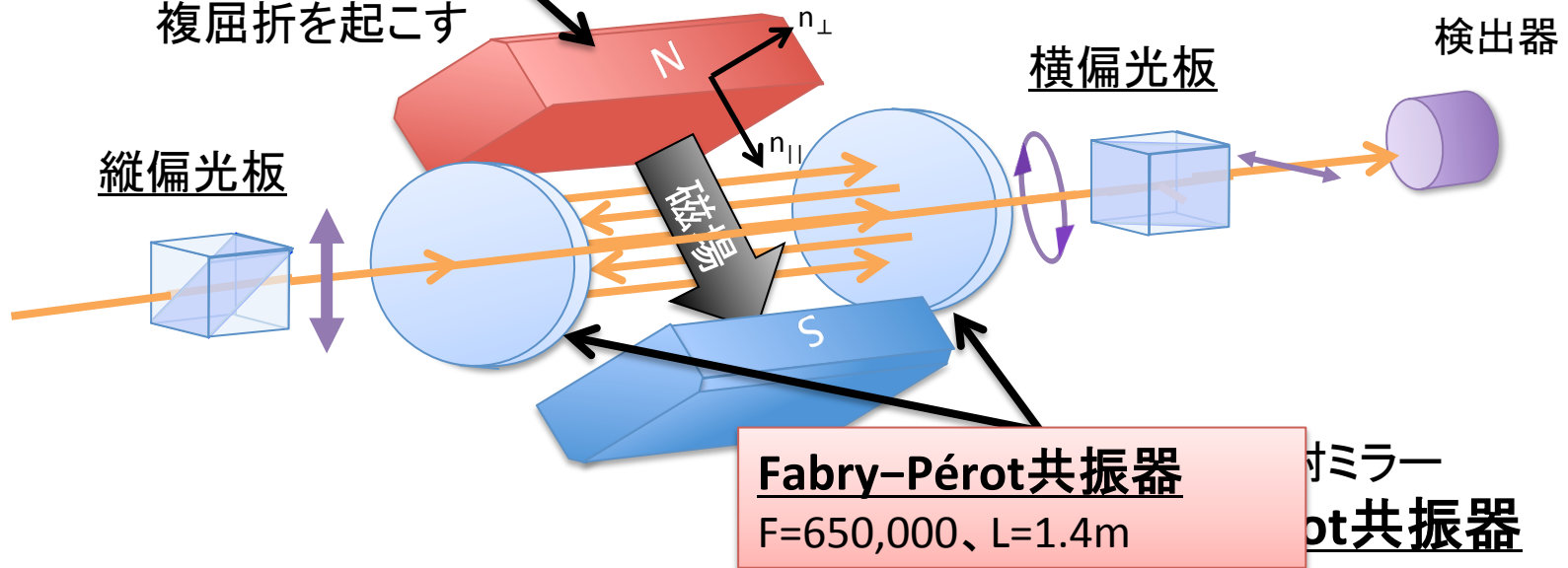
$$\psi = \frac{2\pi k_{\text{CM}} B^2 L}{\lambda}$$

QEDでは $k_{\text{CM}}=4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^{-2}]$ で、
 $\lambda=1064\text{nm}$ 、 $B=10\text{T}$ 、 $L=100\text{km}$ でも $\psi=2.3 \times 10^{-10} [\text{rad}]$

パルス磁石

$B=10\text{ T}$ 、 $L_B = 0.2\text{ m}$ 、繰り返しレート $f_{\text{rep}} = 0.2\text{ Hz}$

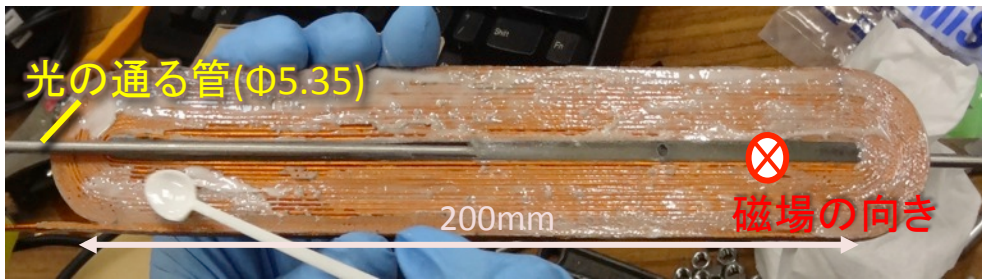
強力な磁場で
複屈折を起こす



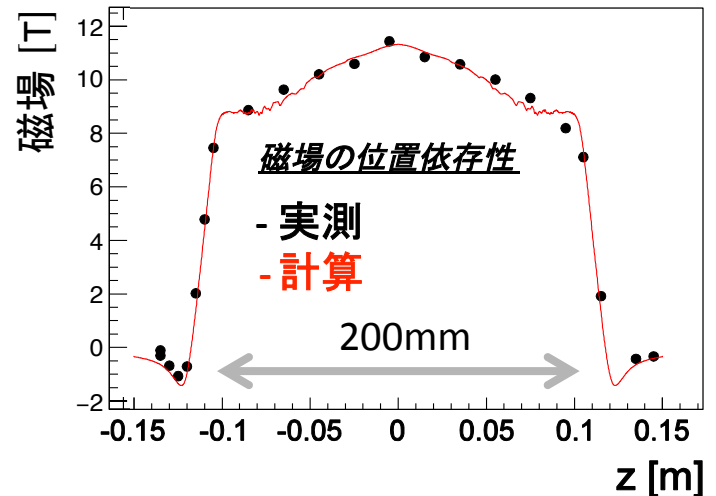
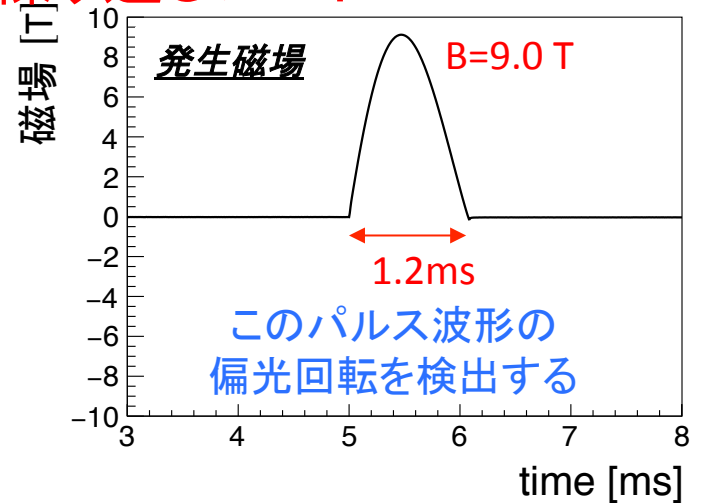
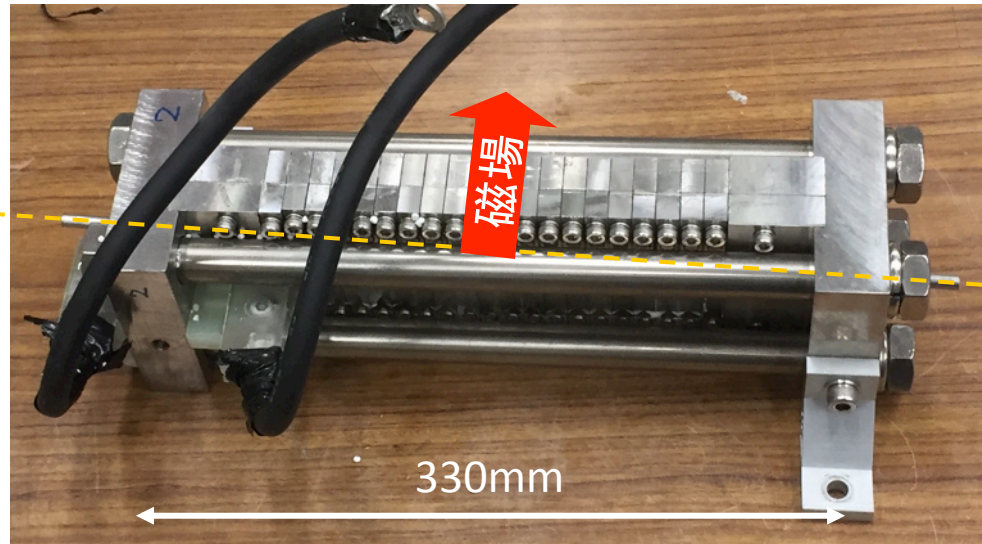
- 偏光板二つを直行配置し、偏光変化を検出する
- 感度は $(\text{磁場強度})^2 \times (\text{相互作用長})^1 \times (\text{統計量})^{1/2}$ に比例
- 半年の測定でQED理論値と同程度の探索感度
稼げる (F: フォイネス = 元の反射回数の $\times \pi/2$)
- 統計量を稼ぐため、パルス磁石を高繰り返しで駆動する。

パルス磁石

- ❖ 銅線を細長く巻き、2.75度の浅い角度で光の管を通す。
- ❖ 9.0 T, -4.5 Tのパルス磁場を2秒間隔10秒周期で発生 → 0.2Hz
- ✓ 従来のパルス磁石のおよそ100倍の繰り返しレート

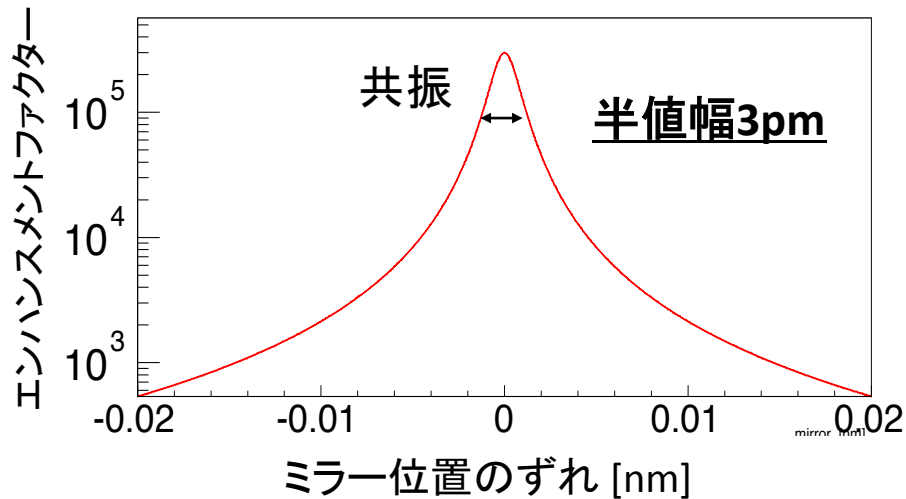


SUS補強

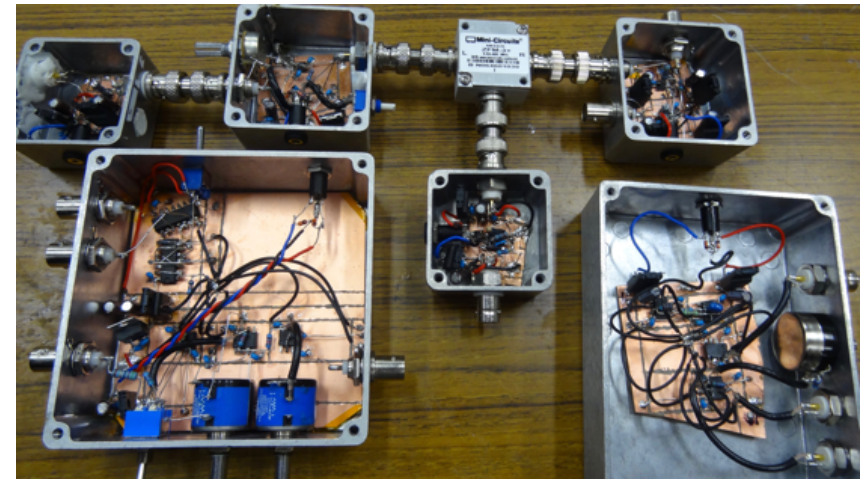


Fabry-Pérot共振器

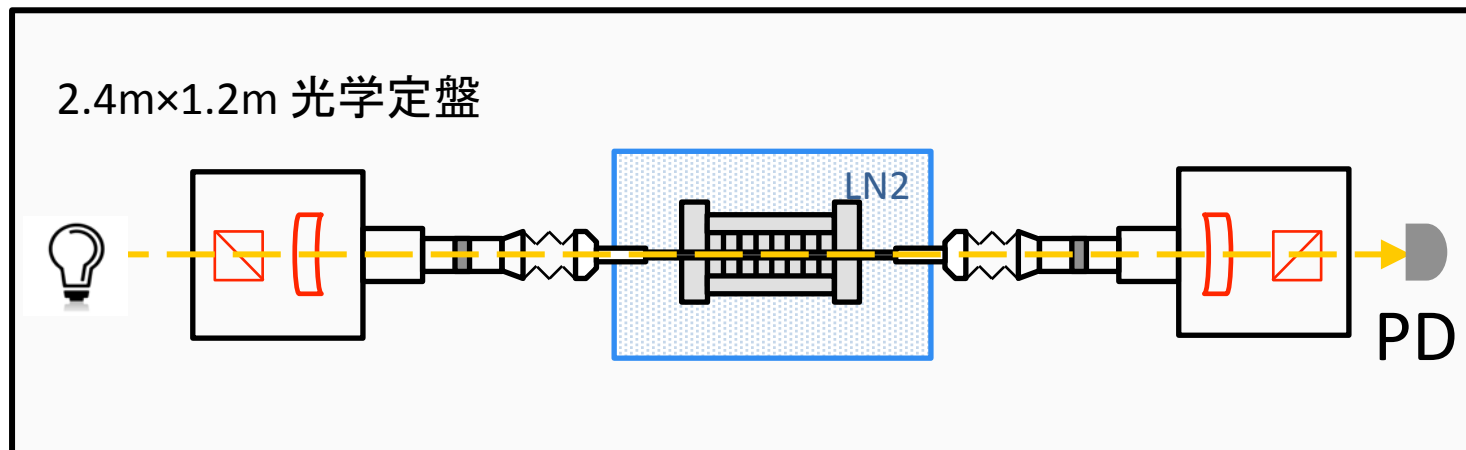
- 現在最も高フィネスが得られる $\lambda = 1064 \text{ nm}$ で共振器を製作
- $R > 99.999\%$ のミラーを用いて、 $F = 650,000$ 、 $L = 1.4 \text{ m}$ の共振器を組んだ。**光路長 = 600 km**、**LIGOと同じくらいで、現在日本最長。**
- 共振条件を保つために、距離精度 3 pm の精度が必要
→ フィードバック回路を手作りして達成。9.0T出しても問題無し。



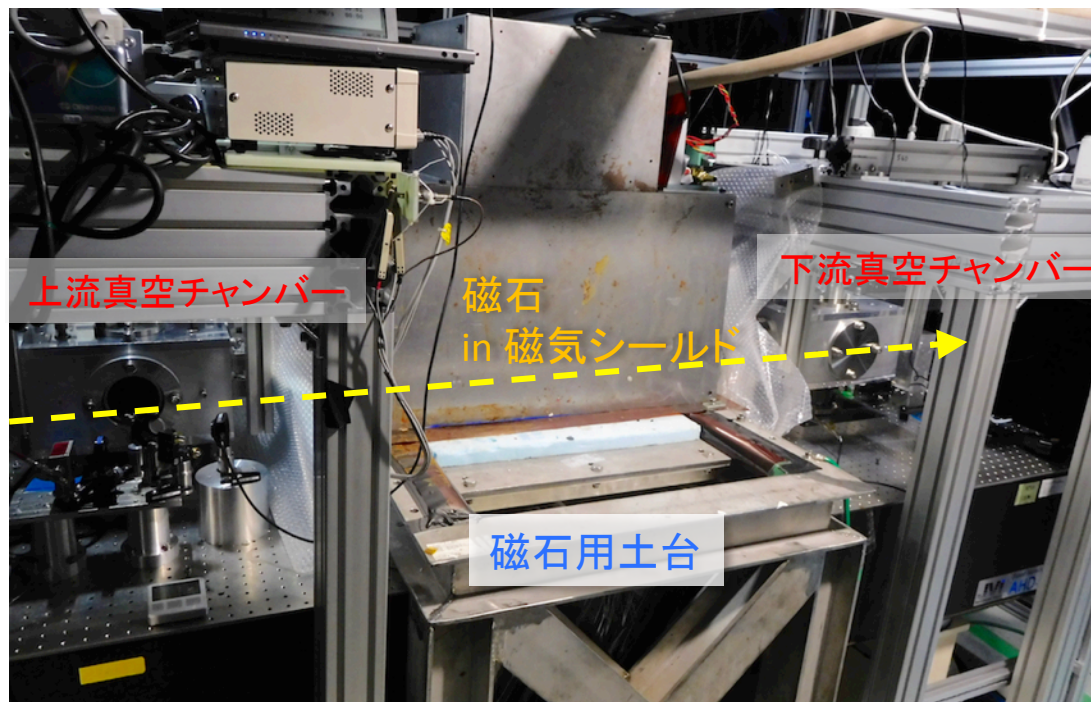
手作りフィードバック回路



組み合わせたセットアップ



- 二枚のミラー、偏光子を真空チャンバー中に配置し、磁石の管に接続。
- パルス磁石による擾乱を抑えるため、除振・断熱・電磁遮蔽などを組み込む
- PDの強度比変化から偏光変化を検出する

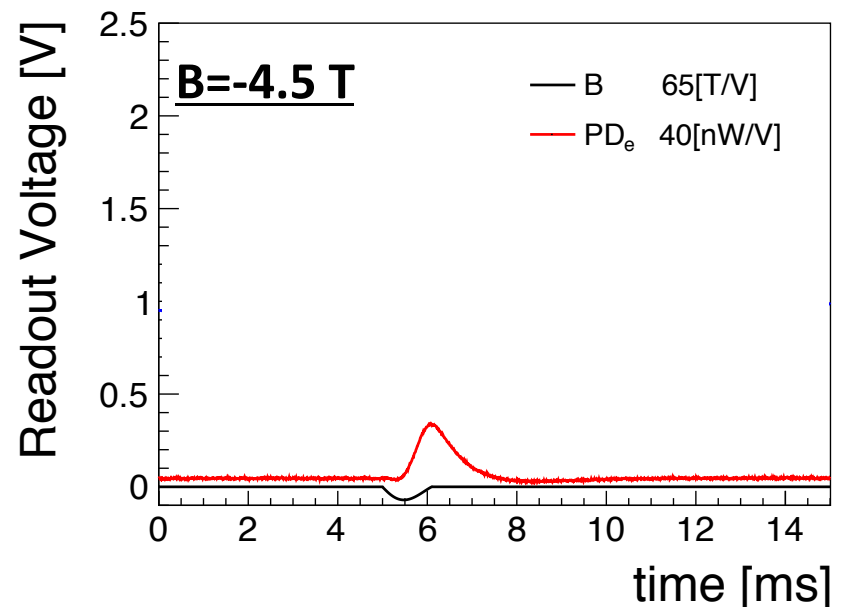
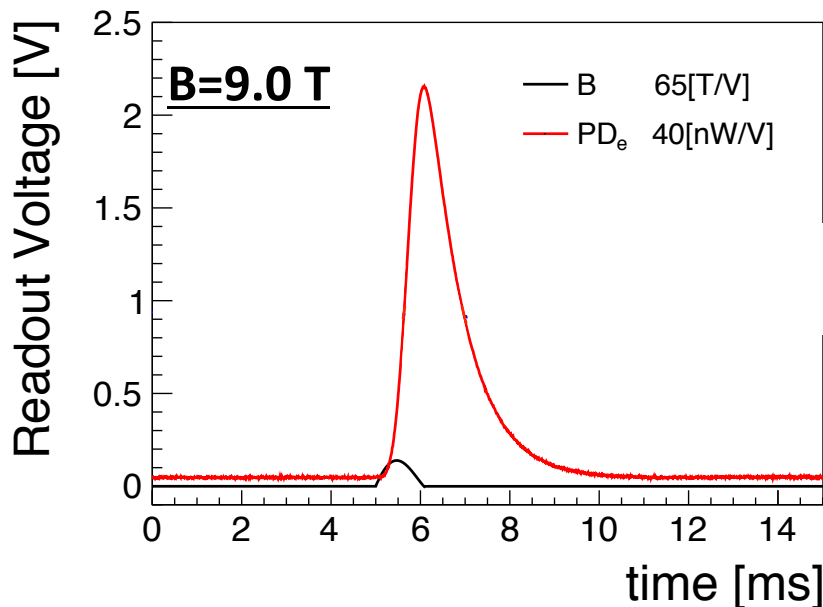


窒素ガスを用いた測定

窒素ガスも磁場中で偏光変化を示す。100-400 Pa封入し、
世界初の低温窒素の複屈折 & ファラデー回転を観測した。

✓ $F=500,000$ ✓ $B=9.0\text{ T}, -4.5\text{ T}$ ✓ 繰り返し0.2 Hz

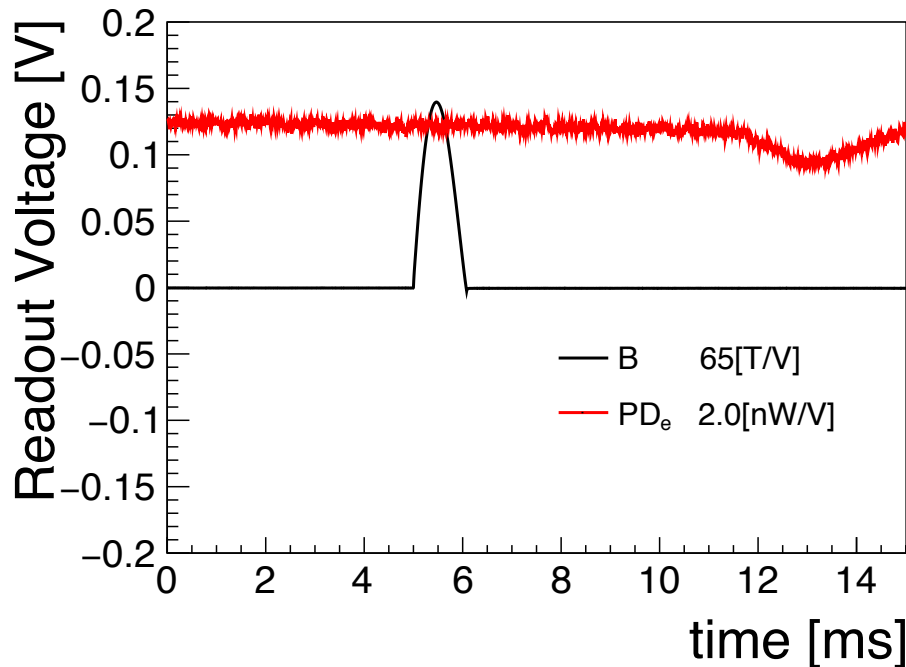
→共振器に印加した磁場としては世界最強



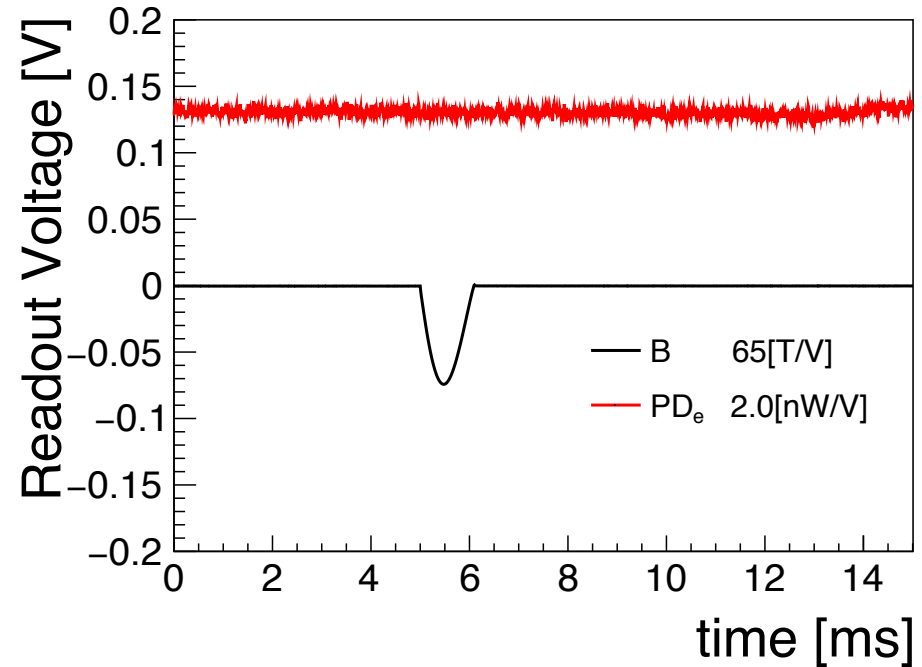
- t=5msの磁場発生と同時にPDの強度が上がる→偏光変化のシグナル
- フィットングにより、窒素ガスの比例係数を取得 → 世界初の低温窒素の磁場中での振る舞いを測定

真空の偏光回転の探索

B=9.0 Tのとき



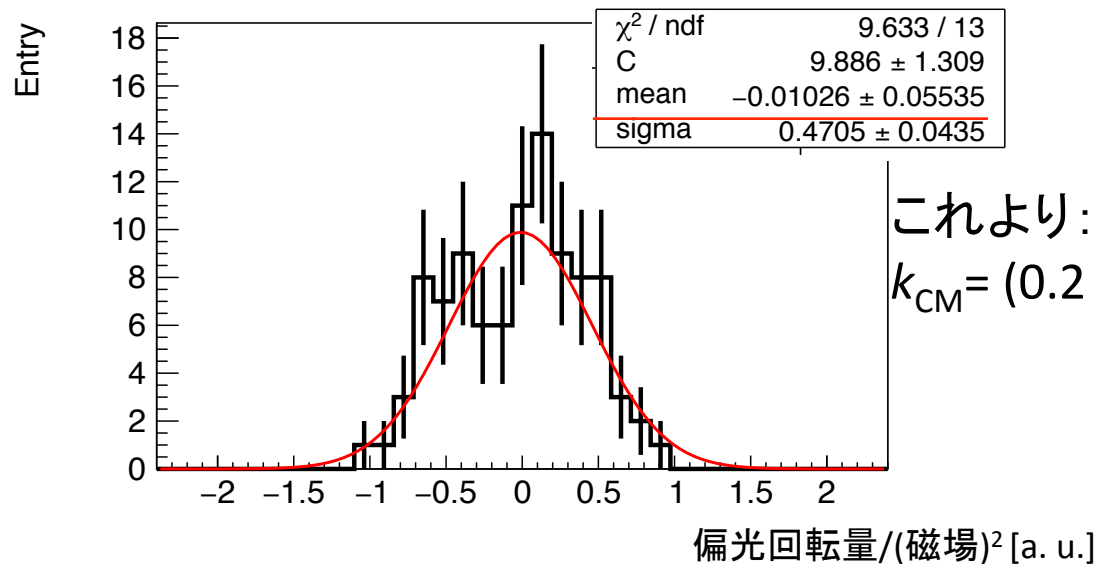
B=-4.5 Tのとき



- 同様のデータを高真空で行う。このとき $F=320,000$ 。
- $t=5\text{ms}$ の磁場発生時のPDの大きな強度変動なし
- 同様にフィッティングし、結果から偏光回転の上限値を求める

結果

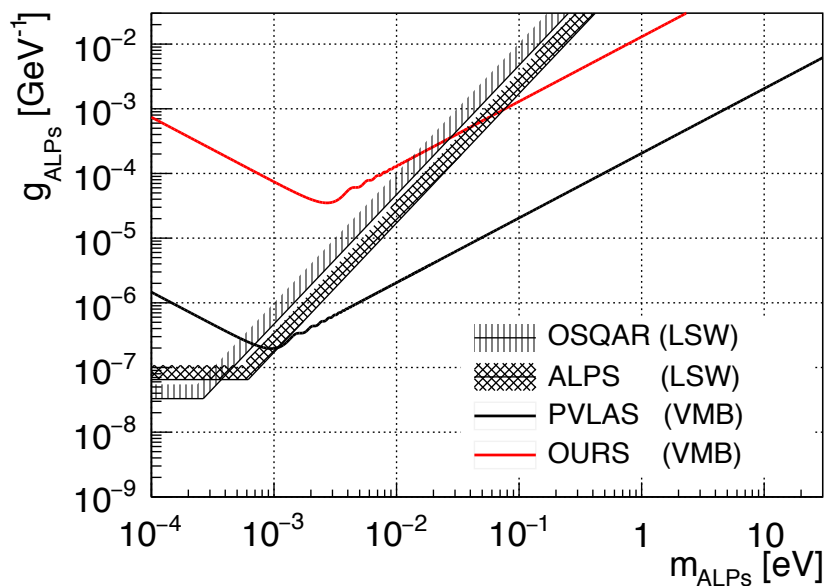
- 各パルスについて、フィッティングによって得られた結果でヒストグラムを作成
- その中心値とエラーから、**偏光回転量に上限をつける**



- QEDの予測する値まで5.5桁。共振器に印加した磁場は世界最強。
 - 感度は光強度=統計量でリミット → すでに改善済み。2桁向上。
 - 加えて、15Tの新しい磁石を設計済。縦に4つ並べ、これで1.5桁向上。
 - データ取得時間を3ヶ月に伸ばし、2桁向上予定。現在準備中。

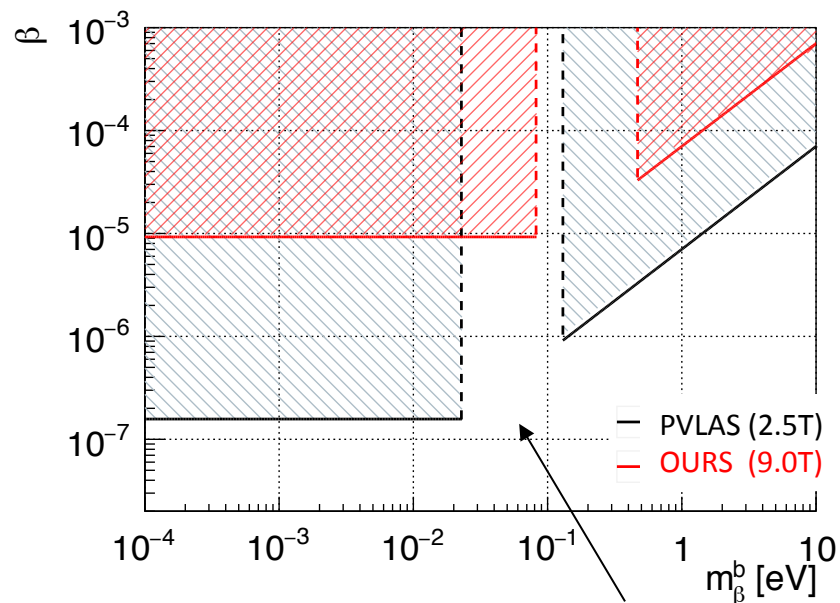
未知粒子への制限

Axion-Like Particlesへの制限



先行実験に及ばないが、
 $m > 0.1$ eV領域で、LSW実験より厳しい制限

MilliCharged Particlesへの制限



MCPが存在しても $\psi \sim 0$ になる領域
 磁場の強さとレーザー波長で決まる

磁場が強いため、 $m \sim 0.1$ eV付近で、
 電磁場非線形効果の探索による新しい制限

まとめ

- ✓ 電磁場の非線形相互作用は標準模型やそれを拡張した理論で予測される効果である。
- ✓ 測定のために9.0T -4.5T, 0.2m, 0.2Hzの高速繰り返しパルス磁石と $F > 300,000$ のFabry-Pérot共振器を組合せたセットアップを開発した。
- ✓ まず、低温における窒素ガスの複屈折、ファラデー回転を世界で初めて測定。複屈折の大きさは理論式と無矛盾であったが、ファラデー回転の大きさは理論式と矛盾する結果を得た
- ✓ 真空の複屈折探索も行いQED予測値の5.5桁上の感度を達成した。未知粒子への制限も付け、特にMCPに対しては $m \sim 0.1\text{eV}$ で複屈折による世界初の制限を得た。

本研究は東京大学ICEPP、五神・湯本・井手口研究室、吉岡研究室、金道研究室、東北大学野尻研究室との共同研究です。

この場を借りて深く感謝申し上げます。